

物质流分析方法及其研究进展

张 玲, 袁增伟*, 毕 军

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:物质流分析(substance flow analysis, SFA)通过追踪经济-环境系统特定物质的输入、输出、贮存等过程, 量化经济系统中物质流动与资源利用、环境效应之间的关系, 为资源环境优化管理提供科学依据。系统阐述了 SFA 的内涵及发展历程, 介绍了 SFA 方法体系, 在此基础上对 SFA 研究现状进行了评述。分析表明, SFA 是产业生态学领域内一种重要的产业代谢分析方法, 它在污染物迁移路径追踪及环境影响分析、战略性资源生命周期代谢分析、物质社会存量分析等方面具有十分重要的应用价值。提出了 SFA 的未来应用领域和发展趋势。

关键词:物质流分析; 产业代谢; 产业生态学; 可持续发展

文章编号: 1000-0933(2009)11-6189-10 中图分类号: X24, Q148 文献标识码: A

Substance flow analysis (SFA): a critical review

ZHANG Ling, YUAN Zeng-Wei*, BI Jun

State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6189 ~ 6198.

Abstract: Substance flow analysis (SFA) can quantify relationships between the economy and the environment of a geographically demarcated system. It characterizes the pathways of a substance or group of substances in, out and through that system, which makes it an effective tool to support the resource and environmental management. The study defines SFA and then introduces its evolution process. After that, the paper explains the methodology in detail; followed by discussing its application. The results show that SFA is an important tool for industrial ecology paradigm. It can be applied to (1) trace the pathway of contaminants and analyze their effect on the environment, (2) evaluate the utilization of strategic resources in anthroposphere and (3) estimate in-use stocks of critical substances. In the end, the research examines the perspectives on the research and application of SFA in future.

Key Words: substance flow analysis; industrial metabolism; industrial ecology; sustainable development

人类经济社会活动本质上是一个资源开采、产品加工、产品使用(消费)、废物排放及处理处置的物质代谢过程, 物质流分析(substance flow analysis, SFA)是一种对工业过程物质代谢进行定量化分析的方法, 它通过追踪经济—环境系统中特定物质的输入、输出、贮存等过程, 量化经济系统中物质流动与资源利用、环境效应之间的关系, 为进行资源环境优化管理提供科学依据。

1 SFA 定义及其演变历程

1.1 SFA 的定义

Substance flow analysis(简称为 SFA, 以下同)是一种理解和刻画特定物质(通常为元素、化合物或一类物质等)在某一特定系统内的流动状况的分析工具^[1, 2]。作为产业生态学领域的一种重要分析工具, SFA 遵循

基金项目:国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAC02A15); 国家自然科学基金资助项目(40971302); 国家社会科学基金重大资助项目(06&ZD026)

收稿日期: 2009-04-14; 修订日期: 2009-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanzw@nju.edu.cn

物质守恒定律,它通过量化某一物质或某一类物质流入、流出特定系统和在该系统内部的流动和贮存状况,建立该系统内经济与环境之间的定量关系。国内将 Material flow analysis (MFA) 也译作物质流分析,然而,在广义的 MFA 定义中,material 既包括物质也包括产品^[3],从这个意义上说,它包含了 SFA;而狭义 MFA 的研究对象为既定系统内的综合流,这与 SFA 研究既定系统内某一特定物质流是不同的。

1.2 SFA 演变历程

按照 SFA 方法思想萌芽、方法框架发展完善等过程可以将 SFA 的演变历程大致划分为以下 4 个阶段:孕育期、形成期、发展期、应用与拓展期。

1.2.1 SFA 孕育期(20 世纪 80 年代以前)

从概念的形成来看,SFA 是在“代谢”研究的基础上逐渐引伸出来的。“代谢”一词源自希腊语,它的基本涵义是“变化或者转变”。其基本思想最早可以追溯到 19 世纪 50 年代,被 Jarob Moleshott 作为生物学领域的一个概念提出,他认为生命是一种代谢现象,是能量、物质与环境的交换过程。随后,这一思想在生物学、生态学、化学等自然科学领域,以及哲学、社会学等社会科学领域分别得到了进一步的发展^[4]。

19 世纪 60 年代,人们的环境意识逐渐觉醒,并开始在文化上逐渐接受对经济发展模式的批判。在这一背景下,学术界开始重新审视社会代谢模式,并于 70 年代形成了许多通过研究物质流动来建立经济与环境之间的联系的方法^[5]。Kneese 等在 1972 年提出通过物料平衡的方法追踪社会中物质的流动^[6],为经济系统物质流分析框架的形成奠定了一定的基础。1978 年,Ayres 运用实证方法详细论述了经济系统中物质的迁移路径^[7],这一研究可以看作是 SFA 的前身。此外,这一时期欧洲一些国家的早期实践为 SFA 方法的形成奠定了基础。如荷兰与德国的统计署出于对农产品的流与库存作簿记的传统,在 70 年代就开始为特定化学物质(如磷)制作平衡表^[8]。这使得这些国家较早地将物料平衡方法应用于环境科学领域,一个很好的例子是荷兰莱顿大学的环境科学中心(Centre of Environmental Science of Leiden University, CML)在 80 年代早期便提出用物料平衡方法研究经济系统和环境系统中有害物质的流动^[9]。

1.2.2 SFA 形成期(20 世纪 80 年代)

20 世纪 80 年代可以看作是 SFA 方法形成的一个重要时期,这一时期 SFA 概念被明确提出并有学者开始探索其分析框架。1988 年,Udo de Haes 等第一次提出了 SFA 的概念^[9]。1989 年,Ayres 提出了“工业代谢”的概念^[10],认为经济与环境在物质层面上存在相似性:生物圈中物质被用来生产“生物量”,而经济系统中通过物质的移动、使用和废弃来产生“技术生物量”,而工业代谢便是指将物质和能源通过劳动力转化成产品和废物的整个过程。后来又有学者进一步明确了“工业代谢”的研究目的,即通过研究社会系统中物质的流动来更好地理解环境污染的源头和原因^[11]。自从“工业代谢”这一概念出现后,其衍生出来的产业生态学又作为一个新的研究领域出现^[12],这为 SFA 作为该研究领域内的一种重要分析工具提供了理论铺垫。与此同时,这一时期 SFA 在实践应用方面也取得了一定发展,如欧洲的丹麦从 80 年代起由其国家环保署采用 SFA 的方法开展了国家层面上一些特定物质的物质流动研究,包括一些有毒有害的重金属以及 PCBs 和 CFCs^[13]。

1.2.3 SFA 发展期(20 世纪 90 年代)

90 年代开始,SFA 分析框架基本形成,并得到一定的发展。Stigliani 和 Anderberg 开展了莱茵河流域的水污染根源分析,表明在过去的几十年内,水污染根源已经从工业转向消费者^[14]。Brunner 和 Baccini 提出了“人类圈代谢”的概念^[15],后来又用物质平衡方法追踪了给定区域内经济系统中单个物质或者物质群的流动和库存状况。这一研究考虑了如何识别某一地区的关键性流与库存,并对特定污染减排措施进行了有效性评估^[16]。Bergbäck 等在 1992 年进行了一项基于历史视角的瑞典金属流动的研究^[17],并较早地意识到物质的累积库存对目前和将来环境污染的重要性。随着环境问题逐渐引起重视,SFA 被更加广泛地应用于追踪工业系统中有害物质的流动状况^[18~21]。

1996 年,莱顿大学 Van der Voet Ester 在其博士论文中详细阐述了 SFA 的基本研究框架和具体应用^[22]。1997 年,Udo de Haes 和 Van der Voet Ester 等在德国 Wuppertal 研究所主办的研讨会上指出对 SFA 的术语

和方法进行标准化的必要性,并提出了包括“目标和系统界定”、“清单和模拟”和“结果解释”的技术框架^[1]。这些努力使 SFA 的方法体系得以较大程度的规范,并提高了其作为产业生态学领域内一种重要分析工具的认可度。

1.2.4 SFA 应用与拓展期(21 世纪以后)

2000 年以后,SFA 逐渐成为产业生态学领域中对实体经济的代谢进行定量化研究的基本分析工具之一^[23,24],得以更加广泛地开展。值得一提的是 2002 年以后,耶鲁大学产业生态学研究通过 STAF 项目,取得了一系列的研究成果^[25-29]。目前,SFA 在国家物质循环分析、城市物质代谢分析、流域营养元素代谢分析等方面得到了广泛的应用。

2 SFA 基本方法体系

2.1 基本组成要素

SFA 主要包括“物质”、“过程”、“库存”与“流”四个要素^[1,30]:

(1)物质 物质是 SFA 的研究对象,这里的“物质”是从化学意义上来理解的,一般指特定化学元素或者化合物^[2],也可以是特定物质或者材料。在具体分析时,会涉及到物质的不同形态,例如研究铜的代谢时,一定会考虑铜在系统中转换的各种途径及其所存在的形态,包括铜矿(及其它含铜矿石)、纯铜、铜合金、各类含铜制品等等。

(2)过程 指物质在系统中的转化、输送或储存,也可以称之为整个研究系统内的子系统。物质在整个产业经济体系中存在不同层面的转化过程,如生产过程、消费过程和自然系统中的转化。输送指物质形式并未转化而位置发生改变,该过程包括所有的为输送而发生的物质流动和废物排放过程。在分析中,有时将过程看作黑箱而只分析输入和输出情况,但如果有必要,这些过程可以被细分为两个或者多个子过程,以便于更细致地分析整个过程。

在“过程黑箱”中,物质停留在该系统内而没有发生转化及运行的过程称为储存,而物质的存储数量一般被称为物质的“库存”。库存的质量和变化速率(累积或者损耗)都是描述存储过程的重要指标。如果物质在某一过程中停留很长时间(如超过 1000a),此时该过程称为最终的汇(final sink)。严格来说,在社会经济系统内的每一个子系统内都有可能产生库存,而在自然环境中的库存一般称之为汇。

(3)流 系统内的每一个过程都有一个输入流端和输出流端,过程与过程之间通过各“流股”相联系。流量和流速用来表征这些物质流的强度和速度,但在常见的 SFA 研究中,一般关注的是每年的“流量”(也可用“流”来指代),而并不涉及流速。

2.2 基本程序

从 SFA 方法出现以来,相关领域内出现了诸多的研究成果。但迄今为止,SFA 研究并没有公认的标准化的方法体系。在荷兰莱顿大学的 Van der Voet Ester 和 Udo de Haes 于 20 世纪 90 年代提出的技术框架的基础上^[1,22],结合对已有的 SFA 实证研究成果的总结,可以将 SFA 的基本程序概括提炼为:(1)目标和系统界定:首先必须明确所要解决的问题,然后根据问题确定研究目标。系统的界定主要包括 3 个方面,即物质、时间、空间,另外在有必要的情况下也要对系统内的子系统进行界定;(2)SFA 分析框架确定:对于 SFA 研究来说,非常重要的一步是确定 SFA 所涉及的系统的拓扑结构,也就是对步骤(1)所界定的系统进行细化,识别需要分析的过程单元和流股;(3)数据获取与计算;(4)SFA 结果的解释。

由以上分析可见,SFA 研究是对进出某一经济实体(区域、国家甚至全球)或者地理范围内的某种物质的迁移路径绘制流程图,建立分析模型,并进行结果解释的一个过程。SFA 的一般性研究框架可以表达为图 1。

具体来说,物质在经济系统中所有的路径,应从矿石开采起,经过生产、加工制造到消费使用,再到最后的废物处理和再生利用;物质在环境系统中的迁移路径一般不在分析范畴内,但物质从经济系统向环境系统的排放是很多 SFA 研究的重点所在。

物质流一般包括:基于产品或者原料供应关系的正向流,废弃产品流,基于废物循环利用的逆向流,最终

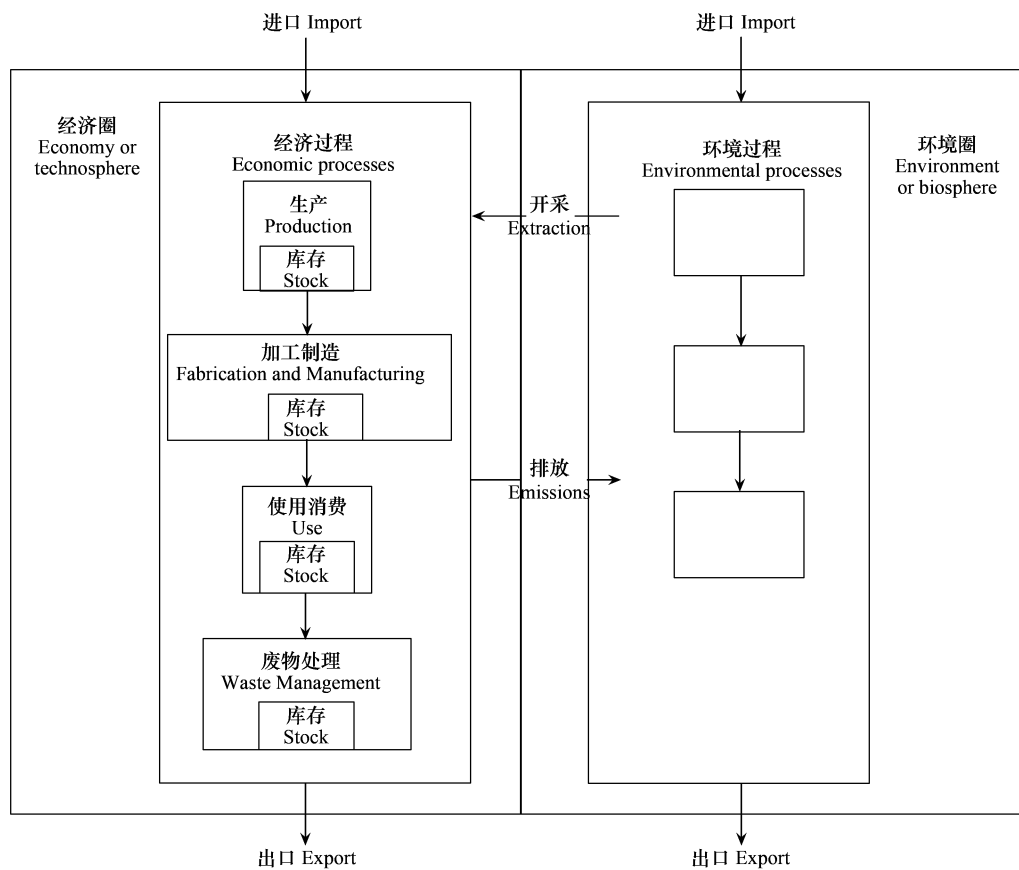


图1 SFA分析框架^[31]

Fig. 1 Research frame of SFA^[31]

废物的处理流,过程损耗而产生的向环境排放的流,贸易进出口流。

库存包括在经济系统中的库存和在环境系统中的库存两大类。前者包括尚未使用的工业中的产品和原材料,社会使用中的产品,社会不再使用但仍未废弃的产品;后者包括岩石圈中的自然资源和填埋废物。

3 国外 SFA 研究评述

从对 SFA 演变历程的分析可见,SFA 研究经历了一个在应用领域上不断扩展,理论上逐渐深入和丰富的过程。尤其是在国外,随着 SFA 研究旨在解决的问题的不同,其研究对象、分析框架和分析的侧重点均有所改变。国外已有 SFA 研究按研究目的大致可以分为 3 类,一是针对环境污染物,如有机物、金属元素和营养元素等进行物质迁移路径追踪或者环境影响分析,二是针对一些战略性材料尤其是金属进行全生命周期的代谢分析,三是进行重要物质的社会库存量分析。

3.1 污染物迁移路径追踪及环境影响分析

SFA 早期研究的物质对象多为有机化合物、金属和营养元素等受环境管理领域关注的物质。研究内容主要是进行环境污染物在生命周期各个阶段的环境影响分析,或者针对某一环境污染问题,通过静态模型分析来追踪产生这一环境问题的根源。

在全球层面上,丹麦环保署在 20a 前便采用 SFA 来识别环境中的有害物质的来源^[13];Thomas 和 Spiro 曾分析了全球铅和镉的开采、使用以及其向环境排放的情况和对人类健康与生态环境的影响^[32]。在国家层面上,Cain 等曾对美国主要的含汞产品从生产、分配到使用、处理整个生命周期过程向大气、水和土壤的汞排放量进行分析^[33]。Stephen 曾对汞在美国的流动情况进行分析^[34];Loebenstein 曾分析了美国砷的使用情况^[35]。

SFA 还被应用于城市和区域层面的代谢研究。学者们认为, SFA 能为不同物质的区域代谢提供重要的定性和定量信息, 从而有助于市政的环境规划与管理。例如, SFA 能识别一个地区需要采取行动来减少环境负荷的热点, 能帮助政策制定者了解不同社会经济活动之间以及这些活动与环境之间的相互关系, 从而将资源使用、有害物质的排放与其潜在根源联系起来^[36]。一些欧洲国家较早地开展了城市层面的 SFA 研究, 如瑞典环保署、斯德哥尔摩郡议会和斯德哥尔摩市资助了一项五年研究计划(1994 ~ 1999 年)——城市森林环境中的金属, 主要研究金属在城市和生物圈中的流动和库存, 以评估城市金属流的环境影响^[37]。Lindqvist 等曾经比较了瑞典 3 个不同城市的镉代谢分析案例, 旨在从已有的研究结论中探究 SFA 在实践中的应用能从多大程度上辅助地方政府决策^[38]。

此外, SFA 还被应用于分析生态系统的基本物质尤其是营养物质的代谢过程。Ayres 等曾对全球层面的碳氮循环进行研究, 以分析这些物质的生物和地球化学过程如何被人类活动所改变: 碳循环主要被化石燃料的使用、采伐森林等所改变, 而氮循环主要被含氮肥料的生产、豆类种植和化石燃料燃烧所影响^[39]。Liu 等曾从消费的视角对全球磷循环及其环境影响进行分析, 结果表明全球对农田的磷投入无法补偿粮食收获以及由于腐蚀和径流而造成的磷损失^[40]。

3.2 战略性资源生命周期代谢分析

如何转变战略性资源的使用以保证社会的可持续发展已逐渐成为各学科的热点问题之一。在产业生态学领域内, SFA 也被用来对战略性资源, 尤其是一些金属在全球、国家或者地区层面的循环情况进行分析, 为产业发展和资源再生利用提供基础性信息, 为环境影响分析和评价提供借鉴等。

从已有的文献看, 针对战略性资源在国家或者全球层面的代谢分析始于 20 世纪 90 年代^[41], 并从 2000 年以后开始逐渐增多。这类研究在应用 SFA 模型时, 主要关注经济实体内战略性资源的流动和库存状况。自 2002 年以后, 耶鲁大学产业生态学中心开展的 STAF 项目取得了大量的研究成果。这一项目旨在解决的问题包括: 从金属的全生命周期过程识别各库存与流, 以发现提高该物质工业利用效率的可能性; 评估流向环境的耗散流; 为资源政策和环境政策提供基础信息。该项目在最初对欧洲铜循环的研究中, 提出了 STAF 框架(图 2)。其后, 又应用这一框架完成了一些重要金属资源如铜、锌、银、铬、铅、铁、镍等在不同层面(包括全球、地区、国家)的循环或者库存情况的研究^[26, 42~54]。

3.3 物质的社会库存量分析

物质的社会库存量分析是 SFA 的研究重点之一。20 世纪以来, 人类对物质的大量使用使得物质从岩石

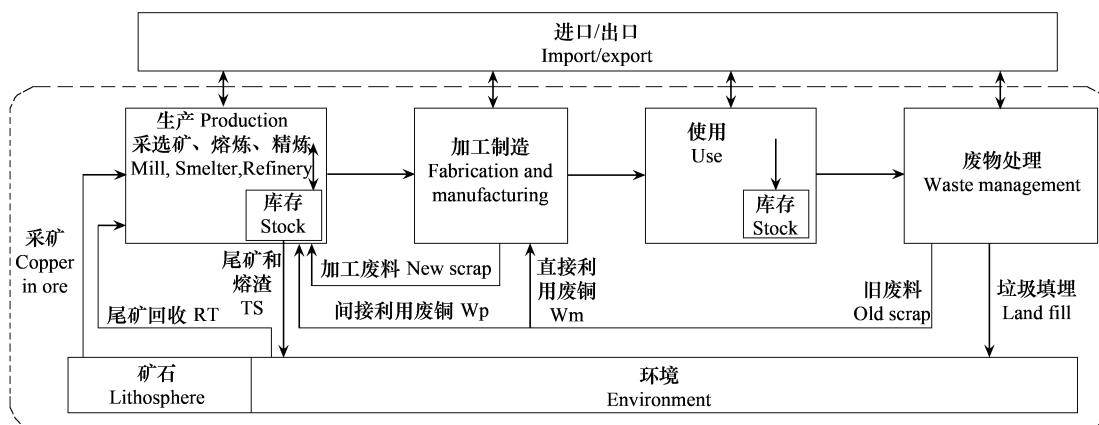


图 2 STAF 框架^[42]

Fig. 2 Analysis framework of STAF Project^[42]

TS: Copper discarded in tailings and slag, RT: Copper in recovered and recycled tailings, Wm: Scrap waste to manufacturer, Wp: Scrap waste to processor

圈逐渐流向人类圈。学者们认为,目前的社会库存在未来会成为废物离开使用阶段或者向环境中排放,因此量化社会库存非常重要^[55, 56]。20 世纪 90 年代尤其是 2000 年以后,国外学术界对物质社会库存量的研究开始大量出现。

Gerst 和 Graedel 曾对金属的社会使用库存研究方法进行总结,认为有两种方法:“自上而下”的方法是根据质量平衡原理,通过新投入使用的产品流和由于产品报废而流出的废物流的差值计算出在某一特定年进入社会库存的量,再通过逐年相加,得到特定时间段内库存的积累量;“自下而上”的方法是基于系统内包含该物质的不同服务单元(如建筑物、工厂和交通工具)的数量和这些服务单元中该物质的使用强度数据,将其相乘得到库存量^[49]。“自上而下”的方法曾应用于铜^[50]、铅^[51]、锌^[52]等金属在全球、区域(如北美、欧洲等)或者国家层面的社会库存研究,而“自下而上”的方法多应用在城市层面上^[53, 54]。除对金属库存的研究外,“自上而下”的方法也被用于估算有毒有害物质在社会使用中的库存状况,以及对未来废物的排放情况进行预测,如 PVC^[56]。

Van der Voet、Elshkaki 和 Kleijn 等曾专门对采用“自上而下”的方法计算社会库存做过较为深入地探讨^[55~59]。他们认为,社会经济系统作为一个“缓冲器”,延迟了输入流的输出时间。假设这个缓冲器的基本特征不随时间而变化,并对数量不敏感,则可以将其看作是线性的、与时间无关的系统,因此“昨天”的输入流是“今天”的库存,并成为“明天”的排放流。在此基础上,他们提出了物质从库存中输出的两种方式,即滤出机制和延迟机制。滤出发生在产品的使用阶段,物质以被腐蚀或者缓慢挥发的方式从产品中输出,这些输出最终释放至土壤、空气、地表水、地下水或者污水系统中。物质在某一应用中(一般为某产品)的滤出量可以看作是总库存量的一部分,一般以线性或者指数的排放系数来表达。延迟与产品使用后的废弃有关,废弃输出流取决于产品的输入流和产品的使用寿命。据此,他们提出物质社会库存的计算模型,并对饮用水安装系统中的铜、建筑工业塑料泡沫的 CFCs、阴极射线管中的铅进行了案例研究。

Harper 针对 SFA 研究中刻画物质的社会使用状况存在较大困难的现状,提出了物质的“最终使用部门模型”和“最终产品模型”,并分别应用这两个模型,对美国 1975~2000 年钨的社会使用情况进行了分析^[60]。这实际上细化了“自下而上”的方法,即讨论在确定含某一物质的单位时采用最终服务单元还是具体产品,对于数据的获取和结果的展示方面有何不同。

4 国内 SFA 研究评述

国内应用 SFA 的研究出现在 2000 年以后,成果相对较少。从研究对象来看,国内研究以金属和营养元素为主;研究系统的地域边界多为国家层面,也有地区(流域)和行业层面;而研究内容侧重于刻画某一物质在一年内的静态循环过程。

在对金属的 SFA 研究方面,东北大学陆钟武较早地开展了一些理论研究和实践应用,他曾提出钢铁产品的生命周期铁流图^[61],毛建素、卜庆才等分别运用陆钟武提出的方法研究了铅工业中铅的工业代谢^[62, 63]和钢铁工业中铁的流动问题^[64]。后来,陆钟武又通过借鉴流体力学中的两种方法:欧拉法和拉格朗日法,提出了 SFA 的定点观察法和跟踪观察法,以及相应的物质流分析模型-物流定点模型和物流跟踪模型^[65]。岳强分别运用这两种方法,对中国铜循环现状进行了分析^[66, 67]。张江徽对 2004 年中国锌循环进行分析^[68]。陈伟强对 2005 年中国国家尺度的铝物质流进行分析^[69],并总结了铝循环过程物质流分析的框架,就数据的来源和可信度等进行了讨论^[70]。

国内对营养元素的 SFA 分析目前主要集中在磷元素上。刘征等运用物质流方法对我国磷资源产业的整个生命周期进行定量描述和分析,考察磷资源的利用和环境影响状况^[71]。刘毅和陈吉宁开展了磷元素在我国和滇池流域的 SFA 研究^[72, 73]。

国内有关物质的社会库存量的研究较少。楼俞等采用“自下而上”的方法,通过确定金属使用单元的数量和强度再逐层累加计算出邯郸市 2005 年的钢铁和铝存量^[74]。

5 SFA 应用趋势展望

SFA 作为产业代谢研究的一种重要分析方法,它通过对物质的追踪来理解经济系统内的某些问题,如识

别某一环境污染问题的经济根源、发现特定资源利用中的效率问题等等。此外,SFA 采用物理量作为单位,弥补了使用货币单位不易进行不同地区和不同时期之间相互比较的缺陷,使这种度量建立在自然科学分析的基础上。但不可否认的是,SFA 研究存在一些局限性,而如何解决或者降低这些局限性,是未来的研究重点所在。

(1)未来的 SFA 研究应注重与其它研究方法的结合,增强研究结果所蕴含的环境、经济和社会研究价值。

目前的 SFA 研究很少考虑经济和社会等因素,因而研究所得出的结论大多只能为决策管理提供一种导向而无法直接应用。因此,未来的研究应增强研究结果的直接指导意义。具体来说,为增强研究结果的社会研究价值,可以进行物质流动背后的驱动因素分析。如研究社会的消费结构与物质流动的关系,不同企业行为、家庭生活模式和消费趋向对物质代谢过程的影响,物质代谢效率与公共政策之间的反馈机制以及资源消耗与消费者行为的关系等。为增强结果的经济研究价值,可以尝试将 SFA 与经济分析相结合,对经济系统的物质和经济特性在同一个框架内进行分析,如可将 SFA 与价值链分析(value chain analysis, VCA)相结合,货币流和实物流并行分析,评价比较具有不同价值的不同物质的环境影响^[75]。为使 SFA 研究结果对相关环境问题更有指示意义,SFA 可以与环境风险评价等相结合,为生态环境问题的有效控制提供科学依据^[76]。

(2)加快构建各类 SFA 研究的基础数据库,简化分析过程,提高结果的可信度。

目前 SFA 研究在很大程度上受限于数据的可得性和可信度,在数据的收集和整理上依赖于大量的假设和参数估算,这不仅增加了研究的工作量,又降低了结果的可信度和深度,并因此而限制了 SFA 的更加广泛的应用。

因此,针对不同的研究目的、研究对象和研究区域,构建具有针对性的基础数据库非常重要。这一方面需要进一步健全目前的统计体系,另一方面需要学者加强基础性调研和研究,不断充实行业、国家和区域的物质代谢数据库。同时,为了提高分析效率,借助并整合已有的物质代谢分析软件如 GaBi、Umberto 等是非常必要的。

(3)开展中小尺度物质代谢状况的研究。

目前的研究多为大尺度分析,加强对中小尺度(城市、开发区和工业园区、生态敏感区等)物质代谢过程的研究,也会是未来研究的一个方向。开展低于国家层面的小区域尺度的 SFA 研究,除数据获取上的难度外,需要解决如何界定地区 SFA 核算中的进口、出口,以及区分国内地区间进出口、国际进出口的问题。

References:

- [1] Udo de Haes H, van der Voet E, Kleijn R. Substance Flow Analysis (SFA), an Analytical Tool for Integrated Chain Management. In: Bringezu S, Moll S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, and Palm V eds. Regional and National Material Flow Accounting, "From Paradigm to Practice of Sustainability". Proceedings of the 1st ConAccount workshop. Wuppertal: Wuppertal Institute, 1997.
- [2] Van der Voet E, Kleijn R, Oers L, Heijungs R, Huele R, Mulder P. Substance flow through the economy and environment of a region. Part I: systems definition. Environmental Science and Pollution Research, 1995, 2: 89—96.
- [3] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis. Lewis Publishers, 2004.
- [4] Fischer-Kowalski M. Society's Metabolism: The intellectual history of material flow analysis, part I, 1860—1970. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(1): 61—78.
- [5] Victor P A. Pollution, Economy and Environment. London: George Allen & Unwin Ltd, 1972.
- [6] Kneese A V, Ayres R U, D'Arge R C. Economics and the environment. A Materials Balance Approach. Baltimore, Md/USA: John Hopkins University Press, 1972.
- [7] Ayres R U. Resources, Environment and economics: applications of the materials/energy balance principle. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1978.
- [8] Olsthoorn C S M. Fosforbalans van Nederland, 1986. Kwartaalbericht Milieu (CBS) 1988, 88/4: 4—9.
- [9] Udo de Haes H A, Guinee J B and Huppes G. Materials balances and flow analysis of hazardous substances; accumulation of substances in economy and environment. Milieu, 1988, 2: 51—55.
- [10] Ayres R U. Industrial metabolism. In: Ausubel J H and Sladovich H E eds. Technology and Environment, Washington D C: National Academy

- Press, 1989. 23—49.
- [11] Anderberg S. Industrial metabolism and linkages between economics, ethics, and the environment. *Ecological Economics*, 1998, 24: 311—320.
- [12] Jelinski L W, Graedel T E, Laudise R A, McCall D W, and Patel C K. Industrial Ecology: Concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 1992, 89: 793—797.
- [13] Hansen E, Lassen C. Experience with the use of substance flow analysis in Denmark. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 6: 3—4.
- [14] Stigliani W M, Anderberg S. Industrial metabolism at the regional level: the Rhine Basin. In: Ayres R U, Simonis U K eds. *Industrial Metabolism*. United Nations University Press, 1994. 119—162.
- [15] Baccini P, Brunner P H. *Metabolism of the anthroposphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [16] Brunner P H, Baccini P. Regional materials management and environmental protection. *Waste Management & Research*, 1992, 12: 203—212.
- [17] Bergbäck B, Anderberg S, Lohm U. Lead Load: Historical Pattern of Lead Use in Sweden. *Ambio*, 1992, 159—165.
- [18] Ayres R U. The life-cycle of chlorine. Part I: Chlorine production and the chlorine-mercury connection. *Journal of Industrial Ecology*, 1997, 1 (1): 81—94.
- [19] Thomas V, Spiro T. Emissions and exposure to metals: cadmium and lead, In: Socolow R H, Andrews C, Berkhout F, Thomas V eds. *Industrial Ecology and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 297—318.
- [20] Stigliani W, Jaffe P, Anderberg S. Metals loading of the environment: cadmium in the Rhine Basin, In: Socolow R H, Andrews C, Berkhout F, Thomas V eds. *Industrial Ecology and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 287—296.
- [21] Van der Voet E, Egmond L, Kleijn R, and Huppes G. Cadmium in the European community: a policy oriented analysis. *Waste Management and Research*, 1994, 12: 507—526.
- [22] Van der Voet E. Substances from cradle to grave. Development of a methodology for the analysis of substance flows through the economy and the environment of a region, with case studies on cadmium and nitrogen compounds. Leiden University, 1996.
- [23] Bouman M, Heijungs R, van der Voet E, van den Bergh J C J M, Huppes G. Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics*, 2000, 32: 195—216.
- [24] Daniels P L and Moore S. Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies. *Journal of Industrial Ecology*, 2002, 5(4): 69—93.
- [25] Bertram M, Rechberger H, Spatari S, Graedel T E. The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecological Economics*, 2002, 42(1—2): 43—57.
- [26] Graedel T E. The contemporary European copper cycle: introduction. *Ecological Economics*, 2002, 42(1—2): 5—7.
- [27] Graedel T E, Bertram M, Fuse K, Gordon R B, Lifset R, Rechberger H, Spatari S. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles. *Ecological Economics*, 2002, 42(1—2): 9—26.
- [28] Rechberger H, Graedel T E. The contemporary European copper cycle: statistical entropy analysis. *Ecological Economics*, 2002, 42(1—2): 59—72.
- [29] Spatari S, Bertram M, Fuse K, Graedel T E, Rechberger H. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows. *Ecological Economics*, 2002, 42(1—2): 27—42.
- [30] Wang S B, Wu F, Liu J R. *Industrial Ecology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [31] Guinée J B, van den Bergh J C J M, Boelens J, Frannje P J, Huppes G, Kandelaars P P A A H, Lexmond T M, Moolenaar S, Olsthoorn A A, Udo de Haes H A, Verkuijen E, van der Voet E. Evaluation of risks of metal flows and accumulation in economy and environment. *Ecological Economics*, 1999, 30: 47—65.
- [32] Thomas V, and Spiro T. Emissions and exposures to metals: Cadmium and lead. In: Socolow R H, Andrews C, Berkhout F, Thomas V eds. *Industrial Ecology and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 297—318.
- [33] Cain A, Disch S, Twaroski C, Reindl J, Case C. Substance Flow Analysis of Mercury Intentionally Used in Products in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(3): 61—75
- [34] Stephen M J. The material flow of mercury in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 1995, 15: 145—179.
- [35] Loebenstein R. The materials flow of arsenic in the United States. U. S. Bureau of Mines Information Circular 9382, 1994, 1—18
- [36] Burström F. Materials accounting and environmental management in municipalities. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 1999, 1(3): 297—327.
- [37] Bergbäck B, Johansson K and Mohlander U. Urban metal flows — a case study of Stockholm. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, Focus 1: 3—24.
- [38] Lindqvist A, and von Malmborg F B. What can we learn from local substance flow analyses? The review of cadmium flows in Swedish municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12 (8-10): 909—918.
- [39] Ayres R, Schlesinger W, Socolow R, Human impacts on carbon and nitrogen cycles, In: Socolow R H, Andrews C, Berkhout F, Thomas V eds.

- Industrial Ecology and Global Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 121 — 155
- [40] Liu Y, Villalba G, Ayres R U, Schroder H. Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(2): 229 — 247.
- [41] Zeltner C B, Bader H P, Scheidegger R, Baccini P. Sustainable metal management exemplified by copper in the USA. *Regional Environmental Change*, 1999, 1: 31 — 46.
- [42] Graedel T E, van Beers D, Bertram M, Fuse K, Gordon R B, Gritsinin A, Harper E M, Karpur A, Klee R J, Lifset R J, Memon L, Spataro S. Multilevel cycle of anthropogenic copper. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38: 1242 — 1252.
- [43] Graedel T E, van Beers D, Bertram M, Fuse K, Gordon R B, Gritsinin A, Kapur A, Klee R J, Lifset R J, Oetjen L, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic zinc. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9 (3): 67 — 90.
- [44] Johnson J, Jirikowic J, Bertram M, Van Beers D, Gordon R B, Henderson K, Klee R J, Lanzano T, Lifset R, Detjen L, Graedel T E. Contemporary anthropogenic silver cycle: a multilevel analysis. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12): 4655 — 4665.
- [45] Johnson J, Schewel L, Graedel T E. The contemporary anthropogenic chromium cycle. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40 (22): 7060 — 7069.
- [46] Mao J S, Dong J, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead I. Methodology. *Resource Conservation Recycling*, 2008, 52: 1058 — 1064.
- [47] Wang T, Müller D B, Graedel T E. Forging the anthropogenic iron cycle. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (14): 5120 — 5129.
- [48] Reck B K, Müller D B, Rostkowski K, Graedel T E. Anthropogenic nickel cycle: insights into use, trade, and recycling. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (9): 3394 — 3400.
- [49] Gerst M D, Graedel T E. In-use stocks of metals: status and implications. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(19): 7038 — 7045.
- [50] Spataro S, Bertram M, Robert B, Henderson K, Graedel T E. Twentieth century copper stocks and flows in North America: A dynamic analysis. *Ecological Economics*, 2005, 54: 37 — 51.
- [51] Mao J S and Graedel T E. Lead in-use stock, a dynamic analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(1): 112 — 126.
- [52] Spataro S, Bertram M, Fuse K, Shelov E, Graedel T E. The contemporary European zinc cycle: 1-year stocks and flows. *Resource Conservation Recycling*, 2003, 39: 137 — 160.
- [53] Rostkowski K, Rauch J, Drakonakis K, Reck B, Gordon R B, Graedel T E. “Bottom-up” study of in-use nickel stocks in New Haven, CT. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 50: 58 — 70.
- [54] Van Beers D, Graedel T E. The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa. *South African Journal of Science*, 2003, 99: 61 — 69.
- [55] Van der Voet E, Kleijn R, Huele R, Ishikawa M, Verkuijlen E. Predicting future emissions based on characteristics of stocks. *Ecological Economics*, 2002, 41(2): 223 — 234.
- [56] Kleijn R, Huele R, van der Voet E. Dynamic substance flow analysis: The delaying mechanism of stocks, with the case of PVC in Sweden. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 241 — 254.
- [57] Elshkaki A, van der Voet E, Timmermans V, Van Hoderbeke M. Dynamic stock modelling: A method for the identification and estimation of future waste streams and emissions based on past production and product stock characteristics. *Energy*, 2005, 30: 1353 — 1363.
- [58] Elshkaki A, van der Voet E, van Holderbeke M and Timmermans V. The environmental and economic consequences of the developments of lead stocks in the Dutch. *Resources Conservation and Recycling*, 2004, 42: 133 — 154.
- [59] Van der Voet E, Huele R, Kleijn R, Ishikawa M, Verkuijlen E. Predicting future emissions based on characteristics of stocks. *Ecological Economics*, 2002, 41(2): 223 — 234.
- [60] Harper E M, A product-level approach to historical material flow analysis- tungsten as a case study. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5/6): 768 — 784.
- [61] Lu Z W. Iron-flow analysis for the life cycle of steel products — a study on the source index for iron emission. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38 (1): 58 — 68.
- [62] Mao J S. Industrial metabolism of lead and its influence on national economy. Shenyang: Northeastern University, 2003.
- [63] Mao J S, Lu Z W. Resource-service efficiency of lead in lead-acid battery. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 24(12): 1173 — 1176.
- [64] Bu Q C. Substance flow analysis and its application in steel industry. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [65] Lu Z W, Yue Q. Two methods for substance flow analysis and their application. *Non-Ferrous Metals Recycling and Utilization*, 2006, 2: 27 — 28.
- [66] Yue Q, Lu Z W. An analysis of contemporary copper cycle in China (I) — STAF method. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005, 4: 6 — 11.

- [67] Yue Q, Lu Z W. An analysis of contemporary copper cycle in China (II) — Substance flow analysis with time factor of the life cycle of products. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005, 5: 4—8.
- [68] Zhang J H, Lu Z W. Zinc circulation analysis in China in 2004 and policy recommendations. *Resources Science*, 2007, 29(5): 81—89.
- [69] Chen W Q, Shi L, Qian Y. Aluminum substance flow analysis for mainland China in 2005. *Resources Science*, 2008, 30(9): 1320—1326.
- [70] Chen W Q, Xiong H, Shi L. Aluminium recycling in China: framework, available data and further work needed. *Resource Recycling*, 2008(6): 50—53.
- [71] Liu Z, Hu S Y, Chen D J. Material flow analysis on China's phosphor resources. *Modern Chemical Industry*, 2005, 25(6): 1—6.
- [72] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis on phosphorus cycle in Dianchi Basin, China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(8): 1549—1553.
- [73] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 238—242.
- [74] Lou Y, Shi L. Analyzing iron and aluminum stocks in Handan City in 2005. *Resources Science*, 2008, 30(1): 147—152.
- [75] Dahlström K, Ekins P. Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK iron and steel flows. *Ecological Economics*, 2006, 58: 507—519.
- [76] Kwonpongsagoon S. Integration of substance flow analysis, transport and fate of materials in the environment, and environmental risk assessment for provision of information for regional environmental management: cadmium as a case study in Australia. University of New South Wales, 2006.

参考文献:

- [30] 王寿兵, 吴峰, 刘晶茹. 产业生态学. 北京: 中国化学工业出版社, 2006.
- [61] 陆钟武. 钢铁产品生命周期的铁流分析——关于铁排放量源头指标等问题的基础研究. *金属学报*, 2002, 38(1): 58~68.
- [62] 毛建素. 铅的工业代谢及其对国民经济的影响. 沈阳: 东北大学, 2003.
- [63] 毛建素, 陆钟武. 铅在铅酸电池中的资源服务效率. *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(12): 1173~1176.
- [64] 卜庆才. 物质流分析及其在钢铁工业中的应用. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [65] 陆钟武, 岳强. 物质流分析的两种方法及应用. *有色金属再生与利用*, 2006, 2: 27~28.
- [66] 岳强, 陆钟武. 中国铜循环现状分析(I)——“STAF”方法. *中国资源综合利用*, 2005, 4: 6~11.
- [67] 岳强, 陆钟武. 中国铜循环现状分析(II)——具有时间概念的产品生命周期物流分析方法. *中国资源综合利用*, 2005, 5: 4~8.
- [68] 张江徽, 陆钟武. 中国 2004 年锌循环分析及政策建议. *资源科学*, 2007, 29(5): 81~89.
- [69] 陈伟强, 石磊, 钱易. 2005 年中国国家尺度的铝物质流分析. *资源科学*, 2008, 30(9): 1320~1326.
- [70] 陈伟强, 熊慧, 石磊. 铝循环过程的物质流分析——框架、数据与待解的问题. *资源再生*, 2008(6): 50~53.
- [71] 刘征, 胡山鹰, 陈定江. 我国磷资源产业物质流分析. *现代化工*, 2005, 25(6): 1~6.
- [72] 刘毅, 陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析. *环境科学*, 2006, 27(8): 1549~1553.
- [73] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 238~242.
- [74] 楼俞, 石磊. 城市尺度的金属存量分析——以邯郸市 2005 年钢铁和铝存量为例. *资源科学*, 2008, 30(1): 147~152.